第40卷 第5期
2023年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 5
May 2023

两种典型大气扩散指数在新疆的分布特征及其适用性对比

赵克明[1]， 孙鸣婧[1]， 李 霞[2]， 施俊杰[1]， 安大维[1]， 许婷婷[1]

（1. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐 830002；
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：为定量评估气象条件对空气污染的作用，利用2010—2020年新疆14个气象探空站及地面气象观测站资料计算大气自净能力指数和静稳指数，对比分析两者在新疆的时空分布特征及其适用性，结果表明：新疆的大气自净能力指数与静稳指数呈反位相分布，两者具有较好的相关性，相关系数达−0.89。大气自净能力指数在夏季最大[$9.4\ t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}$]，冬季最小[$0.9\ t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}$]，南疆[$6.2\ t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}$]普遍大于北疆[$6.0\ t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}$]；静稳指数在冬季最大（5.1），夏季最小（0.7），南疆（1.6）普遍小于北疆（3.8），即南疆的大气扩散条件较北疆好，北疆较南疆更容易形成静稳天气。通过分析2015—2020年大气环境监测站逐日污染数据发现，大气自净能力指数和静稳指数在天山北坡对$PM_{2.5}$和PM_{10}均有较好的指示意义；在阿勒泰两个指数对$PM_{2.5}$有较好的指示意义；在阿克苏静稳指数与$PM_{2.5}$的相关关系通过了显著性检验；在和田自净能力指数与PM_{10}通过了显著性检验。对于首府乌鲁木齐，当污染物排放严重时，若大气自净能力指数在0~20 $t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}$，则易出现重污染天气；静稳指数范围参考意义不大。

关键词：大气扩散指数；静稳指数；大气污染；分布特征；新疆

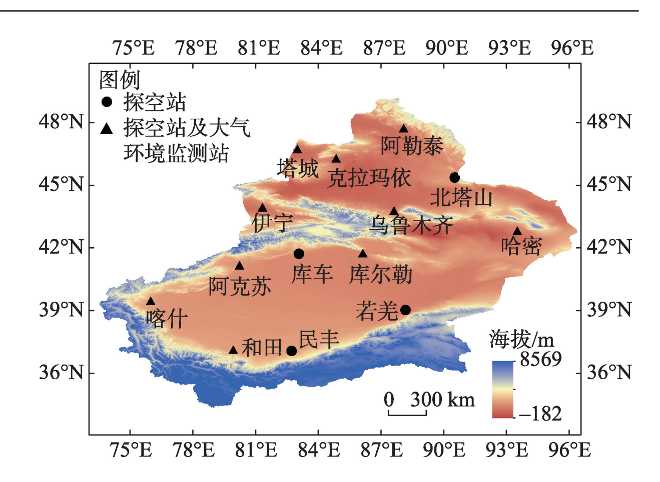
随着经济的迅速发展和城市化进程的加快，由气溶胶造成的大气污染事件越来越多[1]。大气污染受排放源影响，也受气象条件影响[2-3]。在一段时间内，一个地区的自然和人类生产活动产生的污染物排放量大致稳定，但有时出现严重污染天气，有时却是蓝天白云，一个重要的调节因素就是气象条件[4-7]。

气象条件对空气污染作用的问题一直备受关注，比较常见的研究方法有3种[8]。第一种是直接采用污染监测浓度和气象观测资料进行统计分析[9-11]。在小风条件下，大气流动性差，湍流较弱，大气对污染物的扩散输送能力大大降低[12-13]。高相对湿度通常通过气溶胶吸湿性增长导致低能见度，也会造成严重的空气污染[14]。诸多研究表明温度、风速、相对湿度、气压、降水量与城市空气质量的关系较为密切[15-18]。第二种是通过分析空气污染过程对应的天气形势，归纳总结出容易导致空气污染的局地天气类型。苏秋芳[19]分析了干涡、湿涡天气系统下污染物浓度的特征。林廷坤等[20]根据气象条件和污染特征，归纳出了5类大气环流型。第三种是建立综合表达空气污染气象条件的指数，定量评估气象条件对大气污染的作用，诸如采用500 hPa和850 hPa风速及850 hPa和250 hPa的温度距平构建雾霾天气指数[21-22]；利用大气污染物浓度、降水量、通风系数等构建大气环境承载力指数[23]等。国家气候中心构建了大气自净能力指数（Atmospheric Self-purification Capacity Index，ASI）[24]，已在业务中推广应用，近年来在中国不同区域对大气污染均有较好的指示意义[25-26]。美国国家气候数据中心提出了静稳天气指数（Air Stagnation Index，ASI），其由高低层风向和降水量组成，包含风和降水的影响，经改进后在中国也有较好的适用性[27]。

新疆地处中国西北，位于亚欧大陆腹地，地形轮廓复杂。四周有阿尔泰山、帕米尔高原、昆仑山、阿尔金山等高山环绕，天山横亘中央，以北有准噶

收稿日期：2023-01-09； **修订日期**：2023-03-21
基金项目：新疆维吾尔自治区自然基金面上项目（2020D01A99）；国家自然科学基金青年基金（42205010）
作者简介：赵克明（1983-），男，高级工程师，主要从事短期天气预报和大气环境研究. E-mail: zhaokeming_1983@163.com
通讯作者：李霞. E-mail: susannaryy@163.com

尔盆地，以南有塔里木盆地，而山脉内部又有许多山间盆地和谷地，易于污染物的悬浮和沉降，在不同季节均有严重污染[28]。由于特殊地形，南北疆污染成因并不相同，北疆冬季风向多以西北风为主，准噶尔盆地污染空气受天山阻隔在北麓汇集，地形条件不利于污染物的扩散，地处垭口的乌鲁木齐-昌吉-石河子一线往往成为污染重灾区[29]。南疆塔里木盆地有世界第二大流动沙漠——塔克拉玛干沙漠，其流沙面积世界第一且下垫面干燥，沙源丰富，这导致南疆盆地春季约1/3日数都有沙尘天气[30]，风沙天气造成的低能见度和大气污染严重。南北疆不同的污染成因给新疆气象条件与空气污染关系的探究带来了难度。本文选用国内外广泛应用的大气自净能力指数和静稳指数，对比分析其在整个新疆区域的时空分布特征，并结合大气环境监测站的污染物浓度监测数据，揭示两个指数与空气污染的关系，定量评估其在新疆不同地区、不同时间的适用性，为空气质量预报、大气污染治理和防御提供科学参考。



注：底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作，新S(2019)204号，对底图边界无修改。下同。

图1 新疆14个探空站分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of the 14 radiosonde stations in Xinjiang

1 数据与方法

1.1 数据来源

采用2010—2020年新疆14个气象探空站每日08:00的秒级探空数据（垂直分辨率处理为50 m）及其对应的14个地面气象观测站资料，用于计算大气自净能力指数和静稳指数。数据经过新疆气象信息中心质量控质，检查了极端值和范围、参数间的一致性、观测值的连续性。空气质量监测数据来源于生态环境部全国城市空气质量实时发布平台（https://air.cnemc.cn:18007/）。为与探空站一一对应，在全疆筛选了10个城市既有探空站又有空气质量监测站的城市，包括伊宁、塔城、阿勒泰、克拉玛依、乌鲁木齐、喀什、和田、阿克苏、库尔勒、哈密（图1）。时间段为2015—2020年逐日空气质量指数（AQI）、PM_{10}、$PM_{2.5}$浓度数据。数据使用前已对其进行异常值处理、缺测处理，每站的有效数据超过95%，所采用的数据具有代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 大气自净能力指数 国家气候中心构建的大气自净能力指数ASI已成为中华人民共和国国家标准[24]，在业务中推广应用效果良好[25-26]。大气自净能力指数仅仅表示大气自身运动对大气污染物的通风扩散和降水清除能力，与大气污染排放量及空气质量无关。大气自净能力指数值越大，表示大气对污染物的清除能力越强，大气自净能力强；反之，表示大气自净能力弱。其计算公式如下[8]：

$$\mathrm{ASI}=\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2}\times V_e+W_r R\sqrt{S}\right)\cdot C_s/\sqrt{S} \quad (1)$$

式中：ASI为大气自净能力指数[$\mathrm{t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}}$]；$W_r=6\times10^5$为雨洗常数；$R$为降水率，即单位时间内的降水量（$\mathrm{mm\cdot d^{-1}}$）；$S$=100 km^2为单位面积；V_e为通风量（$\mathrm{m^2\cdot s^{-1}}$），是指在混合层高度内，不同高度与对应高度风速乘积的总和，本文所用间隔为50 m。计算方法如下[8]：

$$V_e=\int_0^{MMD}u(z)\mathrm{d}z \quad (2)$$

式中：MMD表示日最大混合层高度（m）；$u(z)$是距离地面高度z米处的水平风速（$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$）。

朱蓉等[8]计算混合层高度采用的是罗氏法，采用地面站14:00的风速、云量、太阳高度角、稳定度等计算获得，以此代表一日中大气对污染物的最大清除能力[25-26]。本文使用干绝热曲线法[31]，利用探空数据求取一日最大混合层高度数据，罗氏法计算出的混合层高度普遍比干绝热曲线法计算出的混合层高度偏小。

1.2.2 静稳指数 静稳指数（Air Stagnation Index，$\mathrm{ASI_{TS}}$）由Jin等[32]提出，用于研究中国北方的雾霾天气，其包含通风量、垂直扩散和湿沉降的影响，即包

含了高低层风向和不同量级降水对大气扩散条件的影响,适用于日到月的时间尺度大气静稳条件分析。静稳指数值越高,意味着大气愈加稳定,愈不利于污染物扩散,反之亦然。具体计算方法如下[32]:

$$ASI_{TS} = \frac{\lambda e^{[1-\delta(r)]}\left[\frac{1}{Z_{PBL}-Z_0}\int_{Z_0}^{Z_{PBL}} U(z)\mathrm{d}z\right]^{-1/4}}{Z_{PBL}-Z_0} \quad (3)$$

式中:λ为常量,取值10^3 s;日降水量≥1 mm,$\delta(r)$取值为1,否则为0。日降水量<1 mm,视为高相对湿度通过气溶胶吸湿性增长导致低能见度,为不利扩散条件;日降水量>1 mm,视为对污染物有稀释冲刷作用,为有力扩散条件,不易造成空气污染。Z_{PBL}为边界层最大混合层高度(m);Z_0为地面高度(m),一般取值为0;$\left[\frac{1}{Z_{PBL}-Z_0}\int_{Z_0}^{Z_{PBL}} U(z)\mathrm{d}z\right]$为边界层平均风速$U_T$($m\cdot s^{-1}$)。

为揭示大气自净能力指数和静稳指数在新疆的时空分布特征,利用全疆14个气象探空站及地面观测站资料计算了各站每日的指数值,并分别进行不同时间尺度的数学平均。大气自净能力指数应用更为广泛,已用在日、月和年的多时间尺度分析,而静稳指数在国内的应用较少,目前已有研究表明,其可用于日和月时间尺度的分析,且对$PM_{2.5}$的浓度有较好的指示意义,两者的效果对比分析有待进一步揭示。

2 结果与分析

2.1 新疆大气自净能力指数和静稳指数的时空分布特征

2.1.1 空间分布特征 由2010—2020年新疆大气自净能力指数和静稳指数的年平均空间分布图可知(图2),新疆的大气自净能力分布很不均匀,总体约在4~7 t·(d·km²)⁻¹,全疆的自净能力大体分为3个层级,北部的阿勒泰最小,为4.25 t·(d·km²)⁻¹,其次是中天山南北坡,站点包括克拉玛依、乌鲁木齐、库车、阿克苏和库尔勒,其大气自净能力指数处于中值,在5~6 t·(d·km²)⁻¹,而北疆西部的伊犁和塔城、北疆东部的北塔山、东疆的哈密以及南疆塔里木盆地南缘的喀什、和田、民丰至若羌一线,大气自净能力处于高值,在6 t·(d·km²)⁻¹以上,哈密市最高,为7 t·(d·km²)⁻¹。

2010—2020年新疆大气自净能力指数[5.97 t·(d·km²)⁻¹]比重庆市[33]的大气自净能力指数高,重庆主城区的大气自净能力指数30 a气候均值为[2.9 t·(d·km²)⁻¹],这两个地区使用的混合层高度计算方法均为干绝热曲线法,有对比性。由于统计时长不一样,无法给出确定结论,但可初步推断新疆整体的大气扩散条件较内陆山地城市高;内陆有些省份,使用罗氏法计算混合层高度,计算出的大气自净能力指数较低。如四川盆地[25]的自净能力指数气候值约为2.6 t·(d·km²)⁻¹,黄河流域[26]的平均大气自净能力指数为4.44 t·(d·km²)⁻¹。

静稳指数在新疆的分布状况与自净能力指数呈反位相,但具体分布并不完全一致,静稳指数大致也分为3个层级,北部的阿勒泰最大为4.6(可见无论是自净能力指数还是静稳指数,均表明阿勒泰的年均大气扩散能力在全疆最差),其次为北疆的其他站点,包括伊宁、塔城、乌鲁木齐、克拉玛依和北塔山,静稳指数约在2~4;静稳指数最小的区域为南疆和东疆所有站,均在2以下。静稳指数在新疆的分布表明,北疆更易形成静稳的气象条件,而南疆和东疆的大气流动性更好,这与自净能力指数所反映出的大气扩散能力基本一致。

2.1.2 时间演变特征

(1) 年内变化特征

由于天山山脉的分隔,南疆和北疆的气候完全不同,分别将全疆、北疆及南疆各站求月平均,其时间变化如图3所示。在新疆,大气自净能力指数年内变化(月平均值)呈倒"V"型,全疆最大值出现在5月,为11.3 t·(d·km²)⁻¹,最小值出现在12月,为1.4 t·(d·km²)⁻¹,春季5月的大气自净能力是冬季12月的8倍;夏半年4—9月大气自净能力指数呈现较大值,均值为8.8 t·(d·km²)⁻¹;冬半年10月—次年3月自净能力较小,这与重庆主城区大气自净能力指数的分布基本一致[33]。对比南北疆的曲线可见,全年大部分时间,南疆的自净能力指数大于北疆(除7月、8月、9月外),两者在秋冬季差异不明显,春夏季差异较大。

全疆静稳指数的月均值呈"U"型。冬半年从10月开始增加,1月达到最高值5.8(较天津、哈尔滨、济南、郑州等城市小[32]),之后逐步减小;夏半年4—9月,全疆静稳指数值都比较小,每月差异也很小,维持在1.0左右(与大部分内陆城市差异不大[32]),最小值出现在6月(0.5),意味着是扩散能力最强的

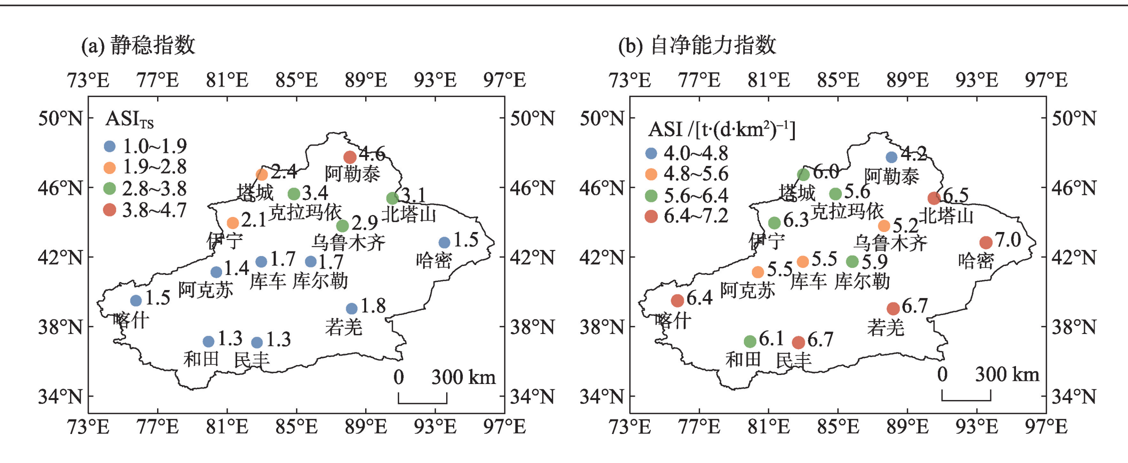


图2 2010—2020年大气自净能力指数和静稳指数年平均分布

Fig. 2 Annual average distribution of ASI and ASI_{TS} in Xinjiang from 2010 to 2020

月份。静稳指数对比南北疆看，南北疆夏半年静稳指数相近；在冬半年，北疆的静稳指数明显高于南疆，比如冬季1月，北疆是8.9，南疆是3.4，南疆是北疆的约3倍。

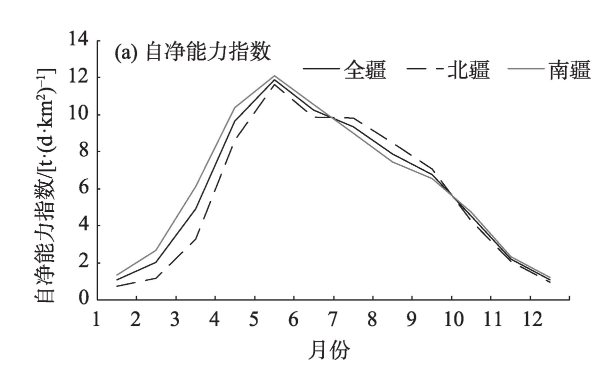
大气自净能力指数和静稳指数表现出的新疆大气扩散能力年内变化趋势基本一致，即夏半年新疆大气扩散能力强，冬半年弱。

（2）季节变化特征

由新疆不同地区大气自净能力指数和静稳指数的四季值可知(表1)，全疆的自净能力在夏季最大[9.4 t·(d·km²)⁻¹]，其次是春季[7.8 t·(d·km²)⁻¹]，秋季排第三[4.5 t·(d·km²)⁻¹]，冬季最小[0.9 t·(d·km²)⁻¹]，这与重庆主城区的季节分布完全一致[33]。与华北地区的四季气候值相比[34]，新疆夏季的自净能力更大，其他季节均小于华北区域，尤其是冬季偏小较明显。华北区域计算混合层高度时所用方法为罗氏法，通常比干绝热曲线法计算的混合层高度小，由此可以推断，新疆春、秋、冬季的大气自净能力指数较华北区域小，尤其是在冬季，偏小更明显。南北疆的自净能力指数对比来看，只有在冬季，北疆的自净能力高于南疆，秋季两者相当，春、夏季均低于南疆，与上文逐月的分析结论一致。

静稳指数在夏季最小(0.7)，其次是春季(1.1)，秋季增大(1.9)，冬季达最大(5.1)。每年的春、夏和秋季静稳指数的变化幅度不大，但在冬季其值跨度很大，冬季多年平均值为5.1，但最大出现过12.1，最小为2.6，可见新疆的静稳指数在冬季不稳定。南北疆的静稳指数对比来看，四季的静稳指数均表现为北疆大于南疆。

为进一步揭示大气自净能力指数和静稳指数在四季的分布特征，图4和图5给出了其在不同季节的空间分布。春夏季，全疆的自净能力都较大，空间差异不明显，春季全疆各站指数在6.3~10.3 t·(d·km²)⁻¹浮动，最大为哈密站；夏季各站在6.5~11.4 t·(d·km²)⁻¹浮动，最大站位于北塔山。秋季，全疆自净能力开始显著减小，且在空间上也呈现出区域差



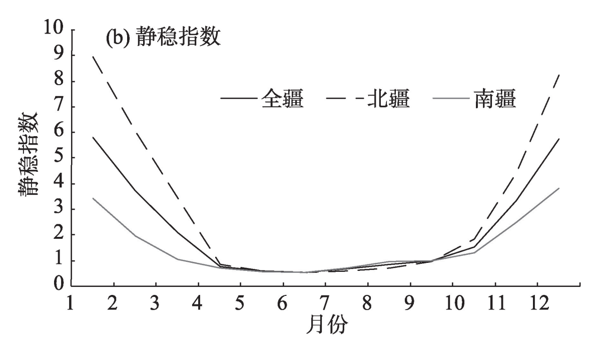


图3 2010—2020年新疆14个探空站大气自净能力指数和静稳指数的逐月变化

Fig. 3 Monthly average of ASI and ASI_{TS} in Xinjiang from 2010 to 2020

表1　新疆不同地区大气自净能力指数和静稳指数的季节分布

Tab. 1　Seasonal distribution of ASI and ASI_{TS} in different regions of Xinjiang

指数	季节	全疆	南疆	北疆
大气自净能力指数	春	7.8	9.6	8.8
	夏	9.4	9.0	9.2
	秋	4.5	4.5	4.5
	冬	0.9	1.7	1.4
静稳指数	春	1.1	0.8	4.6
	夏	0.7	0.7	0.6
	秋	1.9	1.6	2.4
	冬	5.1	3.1	7.7

异，图4c可见，北疆西部的伊宁、塔城及东疆的哈密较小。

在冬季，南疆的大气自净能力指数普遍比北疆大，最大值在民丰为2.5 t·(d·km²)⁻¹，是全疆冬季所有站中，唯一一个值大于2 t·(d·km²)⁻¹的站。南疆盆地东部站的大气自净能力指数要较西部站更大一些，即冬季库尔勒、和田、若羌站的大气扩散条件较喀什、阿克苏、库车站好。北疆的克拉玛依、阿勒泰、乌鲁木齐市的自净能力指数降至1.0 t·(d·km²)⁻¹以下，大气扩散能力很弱，此时如有较重的煤、烟等污染源排放，污染物不能快速扩散稀释，大气污染将会加重。

静稳指数与自净能力指数不同，南北疆的差异在春、秋季较为明显，在夏季和冬季差异不显著。在春季，北疆的静稳指数普遍大于南疆盆地和东疆，即春季北疆的大气条件更为静稳，静稳指数最大站在阿勒泰为2.6，是全疆唯一一个大于2的站，其次为北塔山、克拉玛依和乌鲁木齐站，伊宁和塔城站的静稳指数较小。南疆和东疆静稳指数较小，均在1以下，这与上文春季大气自净能力指数都较大对应一致，说明在春季，南疆和东疆扩散条件好，静稳的大气环流少。夏季只有库尔勒站的静稳指数稍大，其余站均在1以下，但在冬季，北疆所有站的静稳指数都大于南疆站，说明在冬季北疆更容易形成静稳的大气，不利于污染物的扩散，若有充足的污染源，北疆更容易出现重污染天气，这与自净能力指数表现出的大气扩散条件也一致。

（3）大气自净能力指数和静稳指数相关关系

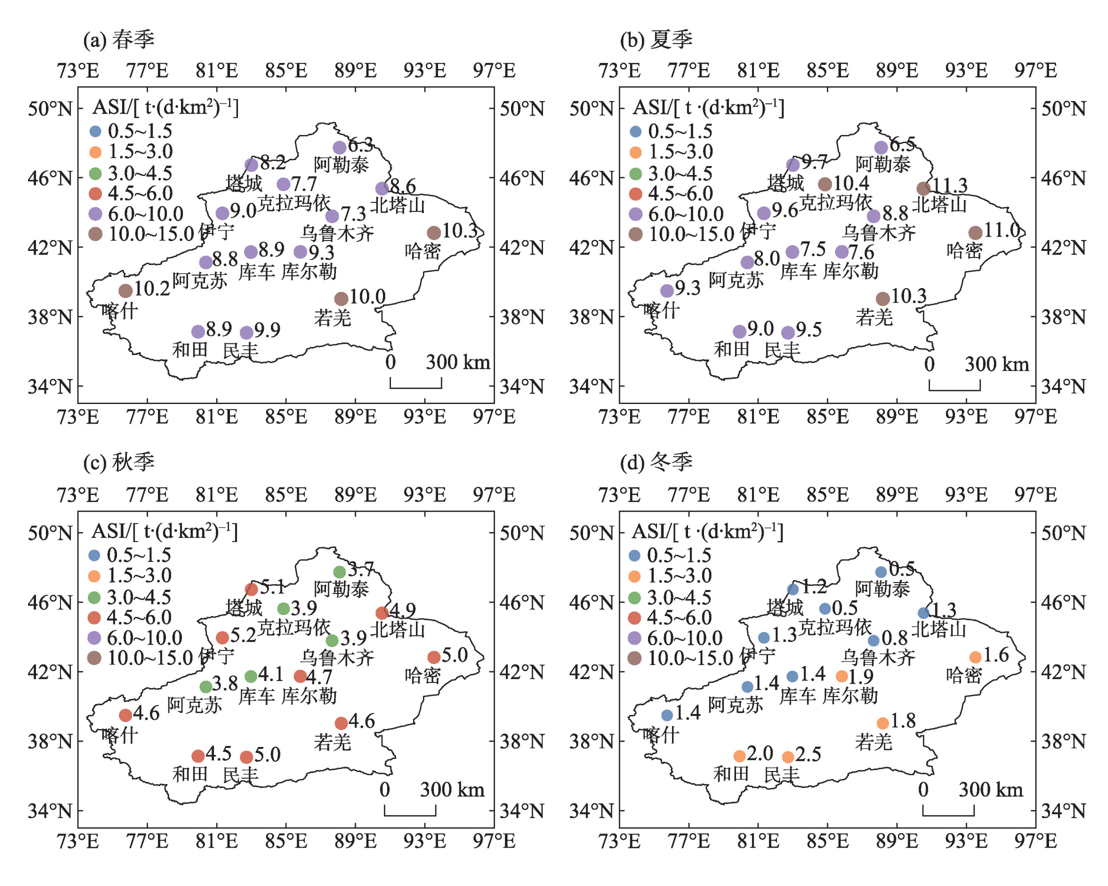


图4　2010—2020年不同季节大气自净能力指数的空间分布

Fig. 4　Space distribution of average ASI in different seasons in Xinjiang from 2010 to 2020

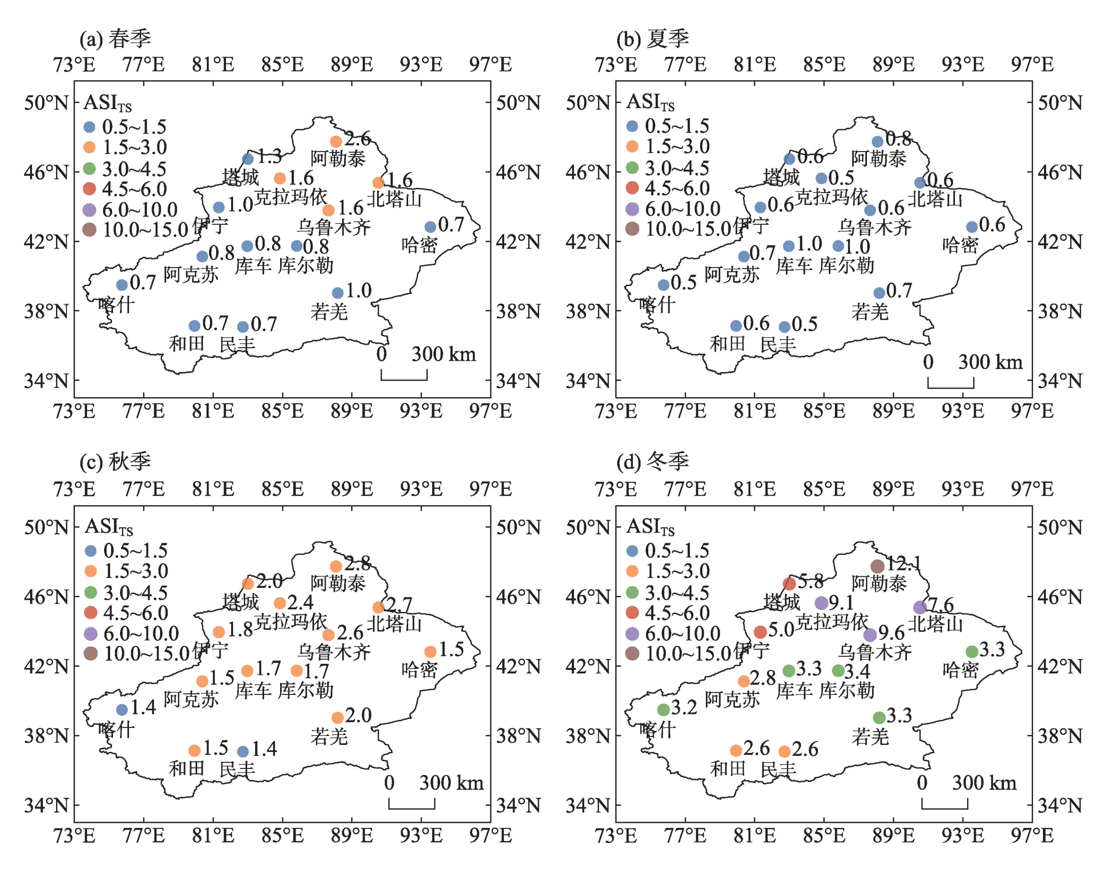


图5 2010—2020年不同季节静稳指数的空间分布

Fig. 5 Space distribution of average ASI_{TS} in different seasons in Xinjiang from 2010 to 2020

表2给出了两个指数的相关系数，两者在新疆呈现显著的负相关关系，均通过了0.01的置信度检验，即大气自净能力强时，静稳条件差，大气自净能力弱时，静稳条件好。对于南北疆不同区域，两者的关系也为反位相相关，北疆两者的相关性更好一些，相关系数为-0.89，南疆的相关系数为-0.86。两个指数均表明大气扩散条件的好坏，但其对空气质量的影响是更为关注的问题。以往的研究表明[28]，南北疆大气污染成因不同，相同的大气扩散条件可能在不同地区起到相反的作用，因此，要进一步分析这两个大气扩散条件指数对新疆空气质量的指示作用。

表2 不同区域大气自净能力指数与静稳指数的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient between ASI and ASI_{TS} in different regions

	南疆	北疆	全疆
站数/个	5	5	10
时间样本/个	60	60	60
相关系数	-0.86*	-0.89*	-0.89*

注：时间样本为60个月；*表示通过了0.01的置信度检验。下同。

2.2 大气自净能力指数和静稳指数与新疆空气质量的关系

2.2.1 新疆空气质量状况 新疆大气污染主要为颗粒物污染[29]，由2015—2020年新疆10个城市$PM_{2.5}$和PM_{10}的平均浓度空间分布可知（图6），整个新疆的大气环境状况从北往南大致可分为“4大片区”，污染程度由北往南逐步加重。第一片区对应45°N以北区域，涵盖阿勒泰和塔城，这一片区$PM_{2.5}$和PM_{10}平均浓度均在50以下，空气质量优；第二片区集中于天山北坡和东疆，包括伊宁、克拉玛依、乌鲁木齐和哈密，$PM_{2.5}$和PM_{10}平均浓度分别为43.4 μg·m^{-3}、88.5 μg·m^{-3}，分别属于优良和轻度污染级别；第三片区是南疆盆地北缘，主要有环绕塔里木盆地北部的绿洲城市阿克苏和库尔勒，PM_{10}污染严重，年平均浓度为188.9 μg·m^{-3}，属于中度污染级别，而$PM_{2.5}$浓度为59.8 μg·m^{-3}，属于轻度污染级别；第四片区是南疆盆地南缘，包括喀什、和田地区，此片区细颗粒物$PM_{2.5}$平均浓度为轻度污染级别（107 μg·m^{-3}），但PM_{10}则为严重污染（321 μg·m^{-3}）。全疆空气质量最

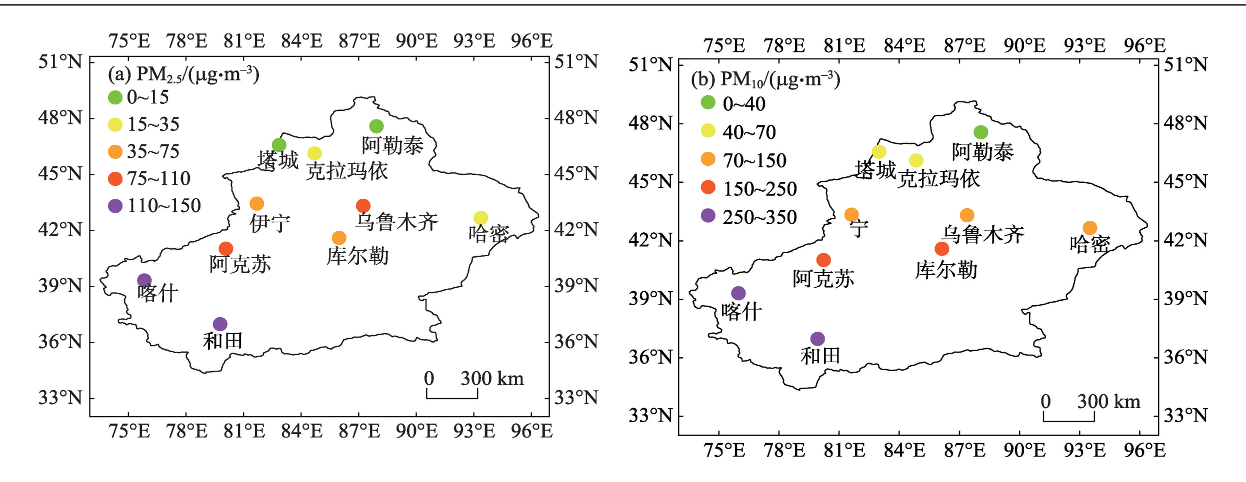


图6 2015—2020年新疆$PM_{2.5}$(a)和PM_{10}(b)年平均浓度空间分布

Fig. 6 Annual average distribution of $PM_{2.5}$ (a) and PM_{10} (b) concentrations in Xinjiang

好、最差的两个城市分别是新疆最北端的阿勒泰和最南端的和田。颗粒物由北向南逐渐加重的这种空间分布模态与郭宇宏、谢运兴等人的研究大体一致[29,35]。

2.2.2 大气自净能力指数和静稳指数与代表性城市颗粒物浓度的关系 在新疆“四大片区”中分别挑选一个代表站,研究其颗粒物浓度与大气自净能力指数和静稳指数的关系,进一步明确其在新疆不同地区的适用性,由大气自净能力指数和静稳指数与$PM_{2.5}$、PM_{10}的逐日时间序列图可知(图7)。“第一片区”阿勒泰的静稳指数与$PM_{2.5}$对应较好,有一致的峰值与谷值,两者相关系数达0.24(表3),超过了0.01的置信度检验;自净能力指数的谷值也基本与$PM_{2.5}$的峰值对应,两者的相关系数为-0.23,也超过了0.01的置信度检验。两个指数均与PM_{10}对应不好,相关系数未通过显著性检验。

“第二片区”代表站乌鲁木齐的大气自净能力指数和静稳指数与$PM_{2.5}$和PM_{10}的相关系数都通过了0.01的置信度检验,静稳指数与PM_{10}的相关系数为0.25,与$PM_{2.5}$的相关系数为0.37;自净能力指数与PM_{10}的相关系数为-0.27,与$PM_{2.5}$的相关系数为-0.4。通过对比$PM_{2.5}$与两个指数的相关性更好,自净能力指数与污染物浓度的相关性更好。同样,伊宁站、克拉玛依站与乌鲁木齐站的情况类似,大气自净能力指数和静稳指数在天山北坡均有较好的适用性。

从“第三片区”的代表站阿克苏来看,PM_{10}的峰值均出现在4月前后,而静稳指数的峰值多在冬半年,两者的峰值只有部分重合,大气自净能力指数亦是如此,其夏半年之初的峰值与PM_{10}有部分重合,因此,两个指数与PM_{10}的相关系数均未通过显著性检验。$PM_{2.5}$的情况略好,其与静稳指数的相关系数为0.17,通过了0.01的显著性检验,但与自净能力指数的相关不显著。

污染最重的“第四片区”代表站和田站的PM_{10}在2—10月均出现过极大值,重污染天数分布不均匀且时间跨度长。静稳指数分布也不规律,季节变化不显著,其与$PM_{2.5}$和PM_{10}的相关系数均未通过显著性检验。大气自净能力指数与PM_{10}浓度的变化趋势一致,且峰值对应也较好,两者的相关系数0.13,通过了显著性检验。值得注意的是,和田站的大气自净能力指数与污染物浓度呈正相关,而乌鲁木齐及阿勒泰站的大气自净能力指数与污染物浓度呈反相关,这是由于北疆污染多由污染源排放引起,大气自净能力指数高时,空气扩散能力好,利于污染物的扩散稀释,而和田污染多为沙尘引起的颗粒物污染,大气自净能力指数高时,更利于沙尘扬起,造成扬沙或沙尘暴。

上述分析结果表明,在不同时间、不同地区两个指数与空气污染的关系并不一致,总体来看,两个指数对天山北坡$PM_{2.5}$和PM_{10}均有较好指示意义,且与阿勒泰的$PM_{2.5}$有显著相关性。对于南疆,阿克苏的静稳指数与$PM_{2.5}$有较好的相关性,和田的自净能力指数与PM_{10}相关显著。

2.2.3 大气自净能力指数和静稳指数对乌鲁木齐污染天气的指示意义 由上文分析可知,两个指数对首府乌鲁木齐均有较好的指示意义,针对乌鲁木齐,绘制三级(一级:优;二级:良;三级:轻度污染;

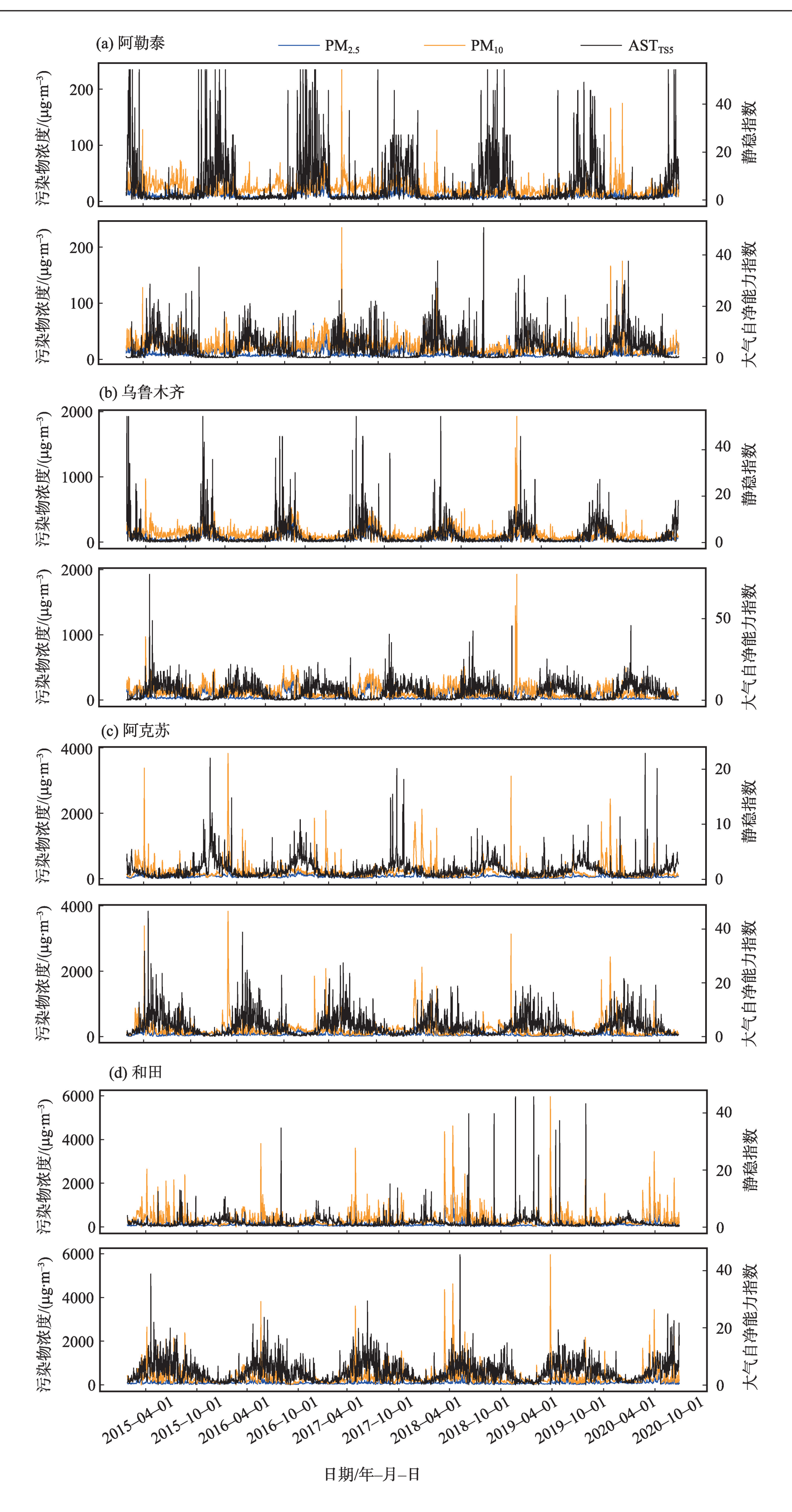


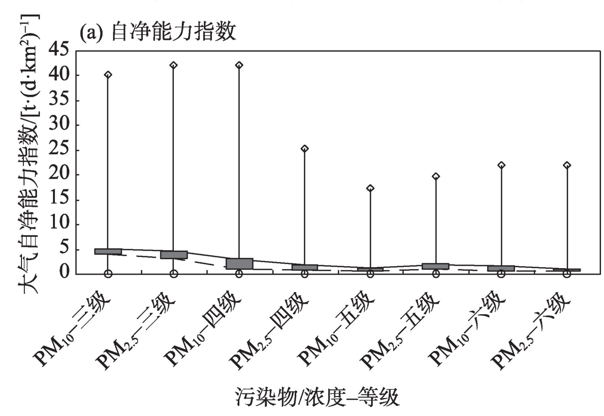
图7 大气自净能力指数和静稳指数与$PM_{2.5}$、PM_{10}的逐日时间序列

Fig. 7 Daily time series of ASI and ASI_{TS} with $PM_{2.5}$ and PM_{10}

表3 代表城市日大气自净能力指数和静稳指数与$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between ASI and ASI_{TS} with $PM_{2.5}$ and PM_{10} in representative cities

指数	污染物	阿勒泰	乌鲁木齐	阿克苏	和田
静稳指数	$PM_{2.5}$	0.24*	0.37*	0.17*	−0.01
	PM_{10}	0	0.25*	0.03	−0.01
大气自净能力指数	$PM_{2.5}$	−0.23*	−0.4*	−0.05	0.1
	PM_{10}	0.03	−0.27*	0.01	0.13*



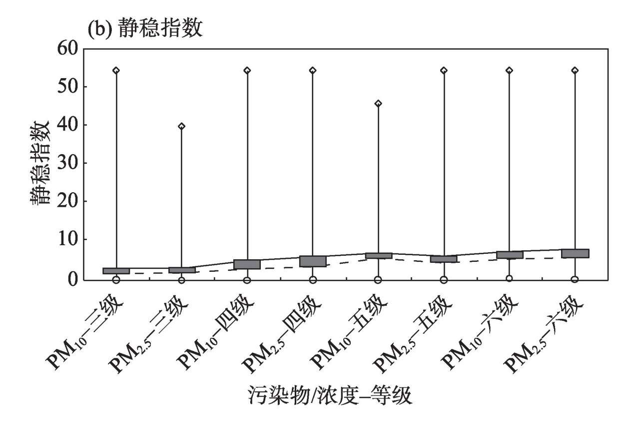


图8 不同污染等级下大气自净能力指数和静稳指数的分布

Fig. 8 Distribution of ASI and ASI_{TS} at different pollution levels

四级:中度污染;五级:重度污染;六级:严重污染)及以上污染级别下两个指数的箱线图(图8)。

当污染级别越高,大气自净能力指数的离散程度越小。当污染物浓度(PM_{10}和$PM_{2.5}$)为三级和四级时,大气自净能力指数离散度较大,最小不到1 t·(d·km²)⁻¹,最大达43 t·(d·km²)⁻¹;当污染物浓度上升到五级时,大气自净能力指数离散度显著下降,范围缩小至0~20 t·(d·km²)⁻¹;污染物浓度为六级时,大气自净能力指数范围也较小,为0~23 t·(d·km²)⁻¹。这是因为当观测到污染物浓度较低时,可能是有大量污染物排放,配合较好的扩散条件导致,也可能是有少量污染物排放,配合不好的扩散条件所致;而当观测到较高污染物浓度时,一定是配合着较差的大气扩散条件。说明当污染物排放浓度高时,若大气自净能力也差,约在0~20 t·(d·km²)⁻¹,则易发生重污染天气。

同样,当污染物浓度为三级和四级(轻度到中度污染)时,可能是污染物排放量大,但大气静稳条件差、扩散能力强,也可能是污染物排放量小,但大气静稳、扩散能力差导致,所以,静稳指数分布范围很大,参考意义不大。在五级及以上污染时(重度到严重污染),静稳指数范围跨度仍较大,为0~54,也不具参考意义,此时,其平均值为6.7,中位数为7.9,可以提供一定参考。

3 结 论

通过对新疆大气自净能力指数和静稳指数的分布特征及其适用性分析,得出以下结论:

(1) 新疆的大气自净能力指数和静稳指数呈反位相分布,即大气自净能力指数大时静稳指数小,两者在全疆都有较高相关性。大气自净能力指数在夏季最大,冬季最小;静稳指数在冬季最大,夏季最小。

(2) 大气自净能力指数在冬季表现出明显的地域特征,南疆普遍大于北疆,即南疆的大气扩散条件较北疆好。静稳指数在春、秋和冬季表现出明显的地域特征,南疆普遍小于北疆,即北疆的大气环流较南疆更为静稳。

(3) 根据$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度分布,将新疆分为4个片区,并分别挑选1个代表站分析自净能力指数和静稳指数与颗粒物浓度的相关关系,两个指数在天山北坡均有较好的适用性,且与阿勒泰的$PM_{2.5}$有显著相关性。对于南疆,阿克苏的静稳指数和$PM_{2.5}$有较好的相关性,和田的自净能力指数与PM_{10}相关

显著。

(4) 对于乌鲁木齐,当污染物排放严重时,若大气自净能力指数在0~20 t·(d·km²)⁻¹,则易出现重污染天气;当污染物排放严重时,静稳指数范围不具参考意义,其平均值为6.7,中位数为7.9,可以提供一定参考。

参考文献(References):

[1] 藏晓芳, 邓文叶, 王志煌. 新疆"十三五"城市空气质量评价分析[J]. 新疆环境保护, 2021, 43(1): 1–9. [Zang Xiaofang, Deng Wenye, Wang Zhihuang. Evaluation of urban air quality in Xinjiang during the 13th five-year plan period[J]. Xinjiang Environmental Protection, 2021, 43(1): 1–9.]

[2] Guo S, Hu M, Zamora M L, et al. Elucidating severe urban haze formation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 49(111): 17373–17378.

[3] Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57: 26–35.

[4] Wang Z F, Li J, Wang Z, et al. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57: 3–13.

[5] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, 31(4): 3–7. [Wu Dui. A Discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(4): 3–7.]

[6] Ding A J, Huang H, Nie W, et al. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(6): 2873–2879.

[7] Che H, Zhang X, Li Y, et al. Horizontal visibility trends in China 1981–2005[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(24): 497–507.

[8] 朱蓉, 张存杰, 梅梅. 大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3601–3610. [Zhu Rong, Zhang Cunjie, Mei Mei. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3601–3610.]

[9] Ma Yongjing, Ye Jianhuai, Xin Jinyuan, et al. The stove, dome, and umbrella effects of atmospheric aerosol on the development of the planetary boundary layer in hazy regions[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(13): e2020GL087373.

[10] Wang L L, Wang Y S, Sun Y, et al. Using synoptic classification and trajectory analysis to assess air quality during the winter heating period in Urumqi[J]. Advance in Atmospheric Science, 2012, 29(2): 307–319.

[11] Wang Z L, Huang X, Ding A J. Dome effect of black carbon and its key influencing factors: A one-dimensional modelling study[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018, 18(4): 2821–2834.

[12] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春$PM_{2.5}$和PM_{10}污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418–427. [Zhao Chenxi, Wang Yunqi, Wang Yujie, et al. Temporal and spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 418–427.]

[13] 潘晨, 康志明. 2001—2019年气象条件对江苏$PM_{2.5}$分布的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 649–662. [Pan Chen, Kang Zhiming. Impact of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ in Jiangsu province from 2001 to 2019[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 649–662.]

[14] Chen C, Sun Y L, Xu W Q, et al. Characteristics and sources of submicron aerosols above the urban canopy (260 m) in Beijing China during the 2014 APEC summit[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(22): 12879–12895.

[15] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(11): 5685–5696.

[16] 王健, 吴彦, 刘晖. 乌鲁木齐市地面风场特征及其对空气污染影响初探[J]. 新疆环境保护, 2008, 30(3): 24–28. [Wang Jian, Wu Yan, Liu Hui. Characteristics of surface wind field and its impact on air pollution in Urumqi[J]. Xinjiang Environmental Protection, 2008, 30(3): 24–28.]

[17] 赵克明, 李霞, 杨静. 乌鲁木齐大气最大混合层厚度变化的环境响应[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 509–513. [Zhao Keming, Li Xia, Yang Jing. Envirenmental response to variation of the atmospheric maximum mixing depth in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 509–513.]

[18] 闵月. 天山北坡乌昌石地区污染天气过程的气象特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 16–24. [Min Yue. The Meteorological Characteristics of Air Pollution in Northern Slope of Tianshan Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 16–24.]

[19] 苏秋芳, 冯鑫媛, 韩晶晶, 等. 2014年冬季至2017年春季干、湿西南涡活动对四川盆地空气污染影响的对比研究[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(3): 78–85. [Su Qiufang, Feng Xinyuan, Han Jingjing, et al. Comparative study on the effect of dry and wet southwest vortex activity on air pollution in Sichuan Basin from winter 2014 to spring 2017[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(3): 78–85.]

[20] 林廷坤, 屈坤, 严宇, 等. 北京市秋冬季环流型下的细颗粒物传输[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 548–557. [Lin Tingkun, Qu Kun, Yan Yu, et al. Fine particulate matter transport driven by circulation types in autumn and winter over Beijing area[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 548–557.]

[21] Cai W J, Li K, Liao H, et al. Weather conditions conducive to Bei-

jing severe haze more frequent under climate change[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 257-262.

[22] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(11): 5685-5696.

[23] Han Z, Zhou B, Xu Y. Projected changes in haze pollution potential in China: An ensemble of regional climate model simulations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17: 10109-10123.

[24] 国家气候中心, 国家气象中心. 大气自净能力等级(GB/T34299-2017)[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. [National Climate Centre, National Meteorological Center. Grads of Atmospheric Self-purification Capability (GB/T34299-2017)[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People' s Republic of China, Standardization Administration of China, 2017.]

[25] 罗玉, 陈超, 张天宇, 等. 1981—2017年四川省大气自净能力变化特征分析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 527-536. [Luo Yu, Chen Chao, Zhang Tianyu, et al. Analysis on the characteristics of atmospheric self-cleaning ability index in Sichuan Province from 1981 to 2017[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 527-536.]

[26] 刘美, 姬兴杰, 左璇, 等. 1961—2019年黄河流域大气自净能力指数变化特征分析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5591-5601. [Liu Mei, Ji Xingjie, Zuo Xuan. Variation characteristics of atmospheric self-purification capacity index over the Yellow River Basin during 1961-2019[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5591-5601.]

[27] Huang Q Q, Cai X H, Wang J, et al. Climatological study of the boundary-layer air stagnation index for China and its relationship with air pollution[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18: 7573-7593.

[28] 孙鸣婧, 李霞, 赵克明, 等. 基于探空数据的新疆大气扩散条件时空分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 113-121. [Sun Mingjing, Li Xia, Zhao Keming, et al. Spatial and temporal characteristics of atmospheric diffusion conditions in Xinjiang based on radiosonde data[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 113-121.]

[29] 郭宇宏, 迪丽努尔·塔力甫, 康宏, 等. 新疆部分城市可吸入颗粒物的浓度及粒径分布[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S12): 240-244. [Guo Yuhong, Dilnur Talip, Kang Hong, et al. The size distribution of fine particle matters in some cities in Xinjiang[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(S12): 240-244.]

[30] 马禹, 王旭, 黄镇, 等. 新疆沙尘天气的演化特征及影响因子[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2): 178-185. [Ma Yu, Wang Xu, Huang Zhen. Evolutionary characteristics and influencing factors of sand dust weather in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(2): 178-185.]

[31] 王式功, 姜大膀, 杨德保, 等. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J]. 高原气象, 2000, 19(3): 363-369. [Wang Shigong, Jiang Dabang, Yang Debao, et al. A study on characteristics of change of maximum mixing depths in Lanzhou[J]. Plateau Meteorology, 2000, 19(3): 363-370.]

[32] Jin F, Quan J, Hong L. et al. An air stagnation index to qualify extreme haze events in northern China[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2018, 75: 3489-3506.

[33] 张天宇, 张丹, 王勇. 等. 1951—2018年重庆主城区大气自净能力变化特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4): 901-910. [Zhang Tianyu, Zhang Dan, Wang Yong, et al. analysis of variation characteristics of atmospheric self-pollution capability in the main urban area of Chong Qing from 1951- 2018[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(4): 901-910.]

[34] 井元元, 李宏宇, 张婧, 等. 1961—2017年华北区域大气自净能力变化特征及其影响因素分析[J]. 热带气象学报, 2021, 37(2): 233- 244. [Jing Yuanyuan, Li Hongyu, Zhang Jing. Analysis of characteristics and influencing factors of atmosphere self-purification capacity in north China during 1961-2017[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021, 37(2): 233-244.]

[35] 谢运兴, 唐晓, 郭宇宏, 等. 新疆大气颗粒物的时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2019, 35(1): 26-36. [Xie Yunxing, Tang Xiao, Guo Yuhong. Spatial and temporal distribution of atmospheric particulate matter in Xinjiang[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(1): 26-36.]

Comparison of the distribution and applicability of two typical atmospheric diffusion indices in Xinjiang

ZHAO Keming[1], SUN Mingjing[1], LI Xia[2], SHI Junjie[1], AN Dawei[1], XU Tingting[1]
(1. Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Service, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the effect of meteorological conditions on air pollution, data from 14 meteorological sounding stations and surface observation stations in Xinjiang were used to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of atmospheric self-purification capacity index (ASI) and air stagnation index (ASI_{TS}) from 2010 to 2020. Results showed a negative correlation between ASI and ASI_{TS}. ASI was the largest in summer and the smallest in winter. It was generally greater in southern Xinjiang than in northern Xinjiang, whereas ASI_{TS} showed the opposite trend. This implied that the atmospheric diffusion conditions were better in southern Xinjiang than in northern Xinjiang, and a static and stable atmospheric circulation more easily formed in northern Xinjiang than in southern Xinjiang. The daily pollution data of air environment monitoring stations from 2015 to 2020 were used to determine the correlation between the air quality of Xinjiang in different seasons and the air quality of five heavily polluted stations and the two indexes. The two indexes highly correlated with the air pollution data of Urumqi station, and the static stability index was better, which can well indicate the degree of air pollution. However, no good correlation was found between the two indexes and the air pollution data of four stations in the southern Xinjiang basin. In the heavy pollution case in the spring of 2018, the PM_{10} concentration span was very large, so the two indexes showed a high dispersion on the scatter diagram, which is not applicable. In particular, in Hotan and Aksu, the two indexes showed a certain correlation with the pollutant concentration, and ASI_{TS} performed better. In Kashgar, ASI showed no correlation with air quality, and ASI_{TS} showed a weak correlation; the two indexes showed no correlation with the air quality of Korla, implying poor applicability. Further study on the distribution of indexes under different pollution levels in the capital city of Urumqi showed that the early warning indicators can be preliminarily condensed as follows: When pollutant emission is serious, and if ASI is distributed at 0−20 $t\cdot(d\cdot km^2)^{-1}$, it is susceptible to heavy weather pollution, and the range of ASI_{TS} is of little significance.

Keywords: atmospheric dispersion index; static stability index; air pollution; distribution characteristics; Xinjiang